

余箇川流域における防災樹林帯の効果

末次忠司* 館健一郎** 小林裕明*** 都丸真人****

1. はじめに

治水対策は、設定された超過確率の洪水に対応した計画に基づいて着実に進められているが、同時に、計画規模以上の洪水が発生した場合に予想される事態に対して配慮しておくことも必要である。勾配が急な氾濫原では、堤内地の樹林により、破堤時の氾濫流を制御することが可能であると考えられる。すなわち、樹林帯が流下する氾濫水に対する抵抗となり、樹林帯背後における流体力を低減させることにより、家屋等への被害が低減される。1958年の狩野川台風による狩野川流域の被害では、家屋の上流に屋敷林を有した民家はわずかな例外を除いてほとんど流失を免れたのに対し、屋敷林のない民家は多く流失したという調査結果が報告されている¹⁾。

防災樹林帯の効果については、都市河川研究室において模型実験、数値シミュレーションによる検討が行われた²⁾。しかし、実際の氾濫原における樹林帯の効果について詳細に調査した事例はない。また、樹林帯を氾濫被害軽減のために実際に適用するためには、氾濫流に対する樹林帯の耐性の把握が必要である。なぜなら、樹林帯が流失してしまっては効果がないうえ、流木の発生源となることで、かえって下流の被害を大きくする可能性もあるからである。

洪水流に対して樹木が及ぼす影響については、主に河道内樹林の伐採や植栽計画、河岸防御工としての樹木群利用等の観点から検討が行われている。特に、樹木の耐性について、洪水後の河道内樹木の倒伏に関する調査³⁾や、引き倒し試験による樹木の倒伏モーメントの計測⁴⁾などが実施されている。既往の論文等より、洪水流中での樹木の流失機構としては、樹木の根元部分の土砂の侵食(樹木の根元付近の土砂が流失して根が洗い出され、支持力が失われて流失、特に、樹木の周縁部が急勾配に切り立っている場合には、側方侵食による流失)、樹木への土石の衝突による損傷、洪水流による

流体力による倒伏(水深・流速に応じて下流に向いた力が加わって押し倒される)が考えられる。

本論文では、平成10年8月末に那珂川水系余箇川で発生した洪水氾濫を対象として、洪水時の堤内地樹林の効果(樹林による家屋被害軽減)及び洪水流に対する樹林の耐性に関する検討について報告する。

2. 調査概要

2.1 余箇川水害

一級河川那珂川水系の余箇川は、河床勾配が1/100程度の急流河川であり、山地に囲まれた谷底平野を無堤の掘込河道が蛇行して流れている。流路延長は37.5km、流域面積は345.5km²である。平成10年8月末の豪雨では、那珂川・阿武隈川流域を中心に大きな被害が発生したが、特に、余箇川の上流では6日間雨量1,254mm、最大時雨量90mm(8月27日午前2時、那須観測所)という記録的な豪雨に見舞われ、河道の疎通能力を超えた洪水流が発生した。図-1に水位と雨量の観測値を示す。河道から溢れた氾濫流は谷底平野に広がり、氾濫原の農地や家屋、土木施設等に大きな被害を及ぼした。

多くの場所で、湾曲する河道を直進するように氾濫流が流下した。大規模な河岸の側方侵食により、低水護岸や農地が流失した。また、大規模な土砂輸送により、礫を含む多量の土砂が耕作地上に堆積した。家屋についても、余箇川流域で全壊68戸、半壊64戸、床上浸水151戸、床下浸水320戸

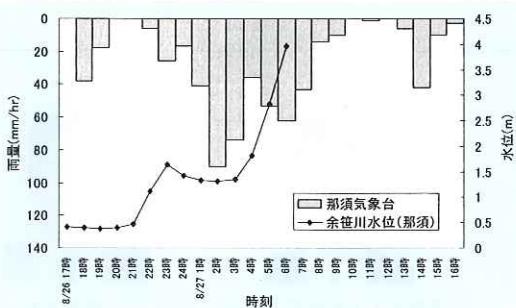


図-1 余箇川(那須地点)水位と雨量(那須観測所)

*余箇川流域の氾濫被害発生は8/27早朝



写真-1 樹林により被害が軽減されたと考えられる家屋の一例(余緑川氾濫原)

の被害が生じた。

余緑川流域の航空写真からは、氾濫原内の多くの家屋が、河川上流側に小さな樹林を有していることが分かる。それらは、防風林として植えられたといわれているが、洪水氾濫流の勢いを抑える効果も期待されているものと推測される。災害直後の調査でも、樹林により被害が軽減されたと考えられる家屋がみられた(写真-1)。その他にも、余緑川沿いには多くの河畔林がみられる。

2.2 検討手法

洪水前後の航空写真の比較や現地調査、資料収集により、洪水時の氾濫水の流況、樹林の残存状況、家屋被害状況を把握した。さらには、数値シミュレーションによる再現計算を行い、樹林が及ぼした効果についての定量的検討を実施した。

3. 調査結果

3.1 航空写真・現地調査をもとにした検討

3.1.1 調査手順

調査は、洪水前(平成8年)及び洪水直後(平成10年9月)に撮影された流域の航空写真をもとにして、余緑川沿川約14kmの区間での氾濫区域、洪水前後の流路の変化、樹木群、家屋等の構造物の位置・特徴及び洪水前後の変化を整理した。なお、航空写真のみでは不明な点も多いため、災害直後のヘリコプターからのビデオ映像、地形図、現地踏査での確認も参考とした。さらに、3区域の樹林を対象として詳細な現地調査を実施して、樹林の氾濫流への影響、家屋被害軽減への効果等を推定するための基礎データ(洪水痕跡、堆積土砂、樹林の状況等)を取得した。さらに、個々の家屋への被害状況を把握するため、那須町・黒磯市による被害状況一覧表を収集した。

以上をもとに、氾濫流に対する樹林帶の耐性、樹林帶が氾濫流に及ぼした影響、樹林帶の氾濫流制御効果(背後の家屋被害軽減)について検討した。

3.1.2 樹林周辺における氾濫水の流れ

航空写真でみられる堤内地の氾濫流の痕跡、さらには現地踏査結果をもとに、氾濫水の流れ方から氾濫域を「浸水区域」及び「流水区域」の2種類に分類した。ここでいう「流水区域」は洪水流が激しく流下し、洪水後の地表面が土砂で覆われたり、表土が流失したりしている区域である。ただし、調査区間全般にわたって、土砂の堆積と侵食のどちらが卓越していたかを把握するのは困難であった。「浸水区域」は、氾濫流がより穏やかに流下し、洪水による土砂移動が少ない区域である。

洪水前後の航空写真の比較及び現地調査から把握した流域の状況(一部区間)を示したのが図-2である。図には、洪水前後の比較から、樹林(洪水後残存、流失)、家屋(洪水後に残存、流失)、流路(洪水前、洪水後)、氾濫区域が示されている。

図-2の区間では、元々の河道は図の右下付近で2本に分かれており、下流側で左に大きく湾曲していましたが、洪水時には外岸側に大きく広がり、洪水後には水田上に新たな河道を形成した。また、洪水が流下した水田上には、礫や砂が堆積していました。

図の上流側には、洪水前には広い樹林が存在していたが、下流側の一部を楕円形に残して流失している。この樹林の右半分については、洪水後に河道と化しており、主に側方からの侵食を受けて流失したものと考えられる。

図の左上には、洪水後も残存した家屋(床上1m浸水の被害)がある。この家屋は、上流側に樹林(杉、竹)を有していた。樹林のうち下流側(家屋に近い側)は洪水後も残存していたが、これらは樹木の生育密度が密かあるいは径の大きな樹林である。一方、残存した樹林の前面に存在した樹林は流失しており、密度が疎であった(住民へのヒアリングより)ことが流失原因と考えられる。洪水痕跡は、残存樹林の中程で1.7m程度であるが、この残存樹林の存在による流体力の低減により、家屋の流失が防止されたものと推定される。

3.1.3 樹林の耐性

洪水前に「流水区域」に存在した樹林の多くは、氾濫流により流れ、洪水後にはなくなっていた。しかし、氾濫流の流下方向や横断方向にある程度

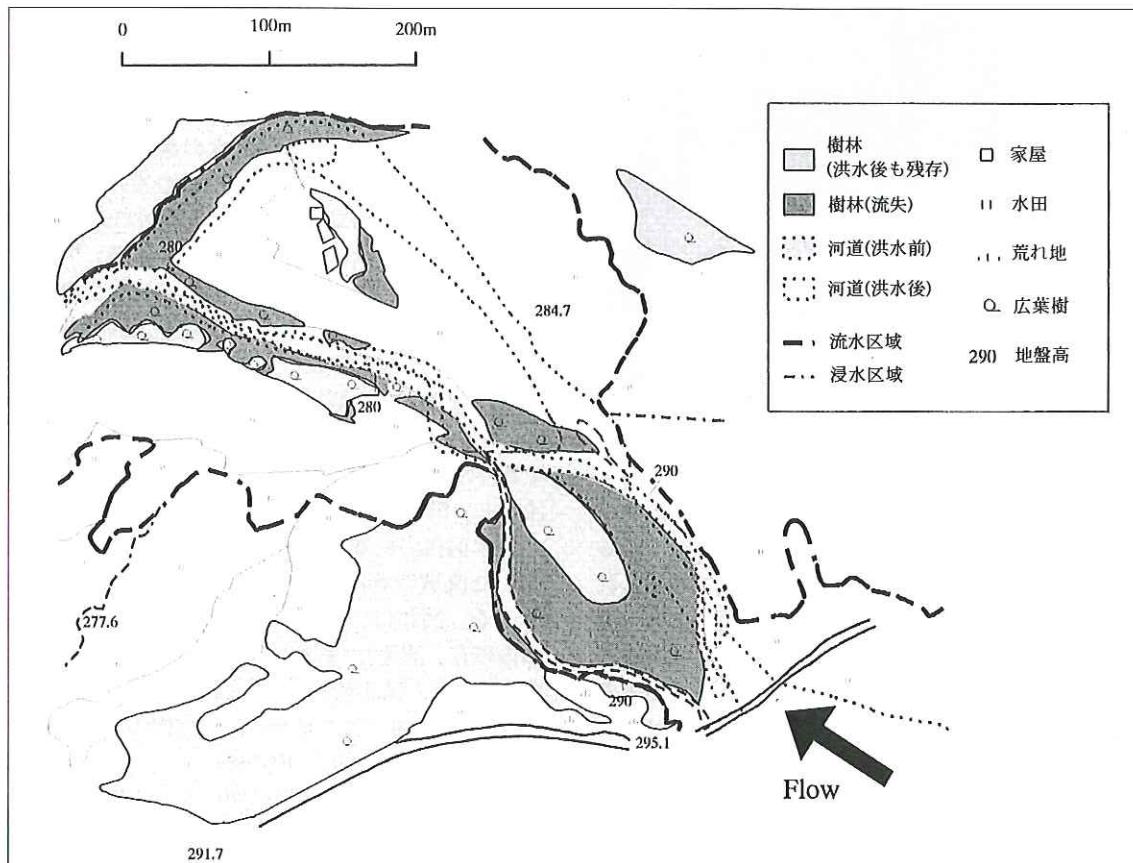


図-2 余笠川流域の洪水前後の変化(一部区間)

*河道(洪水前)の流路が洪水時には「浸水区域」全体に広がり、洪水後には河道(洪水前)及び河道(洪水後)が流路となった。「流水区域」は洪水時に激しく流下した区域である。

の広がりを持った樹林の一部は洪水後も残存した。この理由は、長い樹林区間を流下するにつれ、樹木の抵抗によって流れの勢いが減少していったことによるものと考えられる。

現地踏査の結果、流失した樹木は根の付近の土砂が洗掘されることにより流失したものと推定された。特に、洪水時に河道が大きく広がった場所に隣接する樹林については、側方への侵食により、樹木を支持する土塊もろとも流失している場合が多くかった。また、樹林内部の流失樹木の分布については、樹木が疎に分布している場所に流れが集中して高速流が流れた痕跡があり、その部分については樹木の根元周辺が洗掘されて流失している現象がみられた。

また、氾濫流の流下方向にある程度の延長をもった樹林の場合の堆積土砂をみると、上流側に流径の大きな礫が堆積しており、下流側ほど粒径の小さな土砂が堆積していた。樹林内を流下するに従い、樹木の抵抗で流速が失われていったこと

を示すものと考えられる。

なお、水深及び流速が増加して樹木に加わる流体力が大きくなかった場合には、根元部分を軸にして樹木が倒伏するものと考えられる。しかし、このような形態の樹木流失については、現地調査では明確に判断できなかった。

「浸水区域」については、洪水前に存在した樹林の全てが洪水後にも残存していた。このことから、洪水後に地表面の様相を変化させるような土砂の移動が生じないような流れでは、樹林の流失は生じないものと考えられる。

また、洪水が激しく流下した「流水区域」内には、その広がりがさほど大きくないにも関わらず洪水後に残存した樹林もみられた。このような樹林はその周辺の地盤よりも比高が高くなってしまっており、地盤高も樹林の残存を左右する大きな要因となっていた。

以上より、氾濫流により樹林が流失しないためには、洪水流の流れの激しさに応じた十分な広が

りを有する必要がある。さらに、樹林内での流速を抑制するため、十分な密度を有する必要がある。また、地盤高を高くすることも樹林の破壊を防ぐ重要な要素である。

3.1.4 樹林による家屋防御効果

樹林による家屋被害の軽減効果を検討するため、家屋の上流における樹林の有無と家屋被害の関係について整理した。流水区域、浸水区域それぞれに位置する全家屋について、洪水前の家屋上流側における樹林の有無（樹林の最下流端を起点として、樹林の流下方向幅の3倍の距離以内に含まれる家屋を“前面に樹林がある家屋”と定義）と家屋の被害程度の関係を整理したのが図-3である。

図-3より、氾濫流が激しく流れた「流水区域」では、“樹林なし”の場合に40%以上の家屋が流失している。“樹林あり”で洪水後も樹林が残存している場合には流失家屋は少ないが、洪水により樹林が流されてしまった場合には樹林とともに家屋が流失し、大きな被害となっている。このことから、樹林による家屋の流失被害防止の効果が生じるのは、少なくとも樹林そのものが流されないような流れの範囲である必要があるといえる。

もう一方の浸水区域は氾濫流がより穏やかに流れた区域であるが、“樹林あり”で洪水により樹林が流失した例はなく、樹林がある場合の流失家屋はない。

以上から、樹林自体が流失に耐えうる洪水流の範囲では、樹林が背後の家屋の防御効果を発揮するものと考えられる。

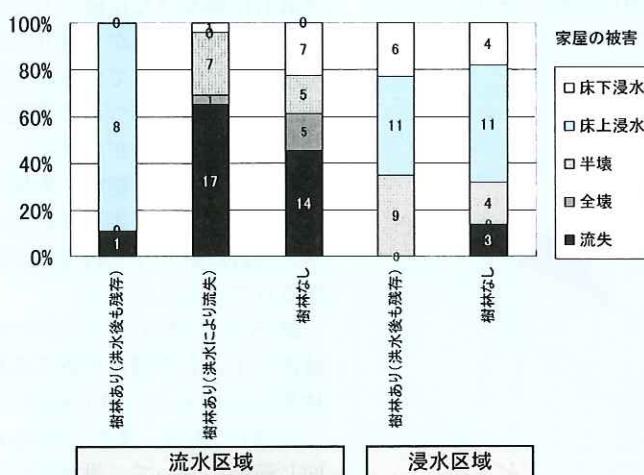


図-3 家屋上流における樹林の有無と家屋被害 (14km 調査区間内)

3.2 泛濫シミュレーションによる再現計算

3.2.1 検討の概要

氾濫流に対する樹林の効果、樹林の耐性、家屋被害軽減の効果をより定量的に推定するためには、まず、洪水時の氾濫流の状況をより正確に推定する必要がある。そこで、余氷川流域の一部区間を対象に一般座標系を用いた二次元不定流モデルによる氾濫再現計算を行い、樹林による流れの変化、樹林や家屋に加わる流体力等を精査する。

3.2.2 計算の条件設定

計算対象エリアは氾濫原に家屋、樹林等が存在する寺子橋周辺（縦断方向に約1km区間）とした。最小サイズ1~2mの一般座標系でメッシュ化することで、地盤高の変化、家屋、樹林、道路の位置等、地形や地物を忠実に表現できるようにした。メッシュ化には、河道平面図並びに洪水後の横断測量結果等を用いた。

モデルの中では、家屋については氾濫流は不透過であるとして地盤高が無限大と設定した。樹林については透過係数（樹木抵抗の大きさの指標で、大きいほど流れやすい、単位m/s）を用いて抗力を表現した。寺子橋周辺の現地調査の結果では、近傍の樹林の幹径は10cm~20cm、密度は0.8~1本/m²であり、高さ1.5m程度から太さ5cm程度の枝が出ている形状をしていた。しかし、場所による樹林形状の違いは不明なため、今回の条件設定では枝の影響は無視して樹木を円柱とみなした。抗力係数Cdを1.0(円柱)、幹径を15cm、密度1本/m²としたときの透過係数11.5m/sを、各樹林メッシュに一律に与えた。また、底面には土地利用に応じた底面粗度係数を与えた。

本検討の対象区間における洪水時の実測流量データは存在しないが、痕跡水位や流出計算による様々な推定値が存在する。今回の計算では、いくつかの流量を与えて再現計算を行い、現地調査で把握された痕跡水位と計算結果が最も良く合致する流量(1,256m³/s)を上流端流量として採用した。

下流端水位は、対象区間の下流端における浸水実績と地盤高的関係から推定して設定した(TP241.8m)。

メッシュサイズが1~2mと非常に小さいため、計算時間間隔は0.005秒とした。上流端流量及び下流端水位を一定値で与え、流況がほぼ不变となる



図-4 寺子橋周辺における氾濫再現計算で得られた流速ベクトル (樹林位置は洪水前の条件)

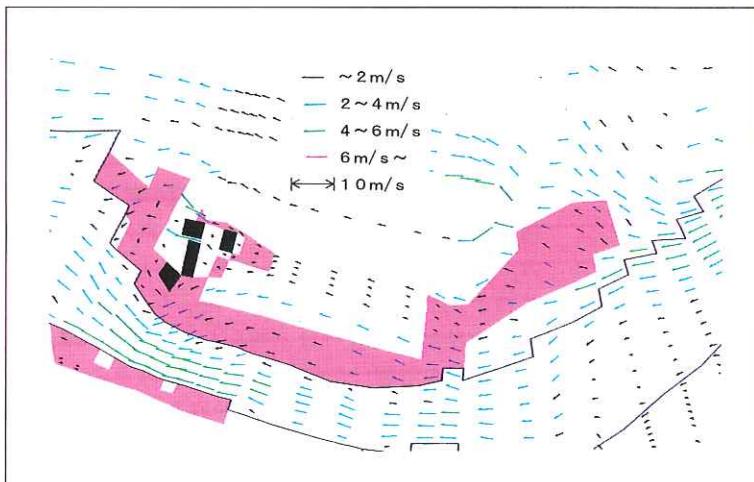


図-5 樹林周辺の流速ベクトル (樹林位置は洪水前の条件)

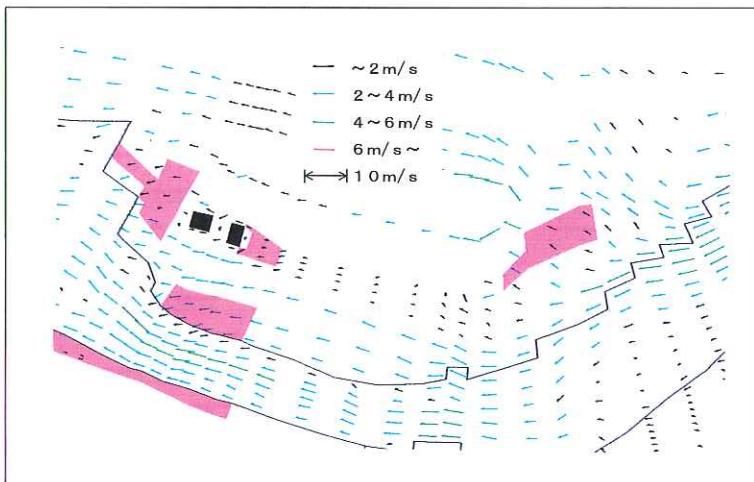


図-6 樹林周辺の流速ベクトル (樹林位置は洪水後の条件)

2時間にわたって計算を行った。すなわち、本検討では、ピーク値のみを対象とした再現計算を行っている。

3.2.3 再現計算の結果

洪水前に存在した樹林帯位置を条件として再現計算を行った結果が図-4(流速ベクトル図)である。

図-4より、周辺よりも低く掘り込まれている河道部分の流速が早くなっている。また、家屋密集地区において流速が低下している様子がみられる。図中の河道右岸側及び左岸側にある樹林には、河道部分から乗り上げた氾濫流が流入しているが、樹林内を流下するにつれて流速が低減している様子が分かる。

再現計算では、樹林や家屋等による流速低減が表現されており、検討に耐えうる再現性が確保されているといえる。

図-5は、図-4で示された区域内の上流右岸側に位置する樹林部分を拡大した図(流速ベクトル図)である。また、図-6は同じ範囲において、洪水後にも残存した樹林の位置を条件として計算した結果である。洪水前

に存在した樹林のうち、上流側並びに河道に近い側、流れが河道に落ち込む下流側の部分が流失している。流失した部分は湾曲している河道の内岸側に位置しており、河道から乗り上げた流れが高速で樹林に流れ込む場所に一致している。この流れにより、樹林の周縁部から徐々に洗掘が進み、樹林が流失したものと考えられる。洪水前の樹林の状態を条件とした結果では、河道に近い樹林内の流速は概ね 2m/s 以下となっているが、洪水後の樹林の状態では、同じ位置の流速が 2~4m/s の高速流となっている。また、河道右岸側及び左岸側の樹林内部では、樹林がある場合に比べて流速の低減が小さくなっている。

今後は、これらの計算結果をもとに、樹林の有無による家屋に加わる流体力の違いと被害状況の関係、樹林の流失と流れの状態の関係等について、詳細に調べていく予定である。

4. おわりに

平成 10 年 8 月末の豪雨による那珂川水系余帷川流域を対象とした調査により、防災樹林帯の効果に関する以下の事柄を明らかにした。

- (1) 余帷川流域の氾濫原の樹林帯の洪水前後の変化の比較より、地表面の状態を著しく改変するような激しい洪水流が流れた場所においては、側方侵食等による根の部分の洗掘が樹林の流失を引き起こしていた。
- (2) 洪水流が激しく流下した場所でも、氾濫流の流下方向あるいは横断方向にある程度の広がりを持つ樹林や、周囲よりも比高が高い場合には、部分的に樹林が残存していた。

(3) 樹林の流失を防ぐためには、樹林内での流速を抑制するための十分な密度が必要となる。

(4) 家屋の上流側に樹林が存在する場合、樹林 자체が流失に耐えうる範囲の洪水流に対しては、氾濫流による被害軽減効果が発揮されるものと考えられる。

今後は、樹林帯周辺の洪水氾濫の再現計算をもとにした定量的な検討を進めていくことにより、樹木が流れに対して及ぼした効果を詳細に検討していく予定である。

謝 辞

栃木県大田原土木事務所には航空写真や洪水痕跡調査結果等を、栃木県土木部河川課には河道平面図等を貸与していただいた。また、黒磯那須消防組合消防本部には災害後のビデオ等を貸与していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 栗林沢一：狩野川流域における集落の立地と災害の形態、地理学評論, 33.3, pp.70-77, 1960.
- 2) 末次忠司、館健一郎、小林裕明：防災樹林帯の氾濫流制御効果、土木研究所資料, 第 3538 号, 1998.2.
- 3) 北川明・島谷幸宏・小栗幸雄：洪水による樹木の倒伏、土木技術資料, 30-7 pp.9-14, 1988.7.
- 4) 建設省河川局治水課：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案), 1993.2.

末次忠司*



建設省土木研究所河川部
河川研究室長、工博
(前 都市河川研究室長)
Dr.Tadashi SUETSUGI

館健一郎**



同 都市河川研究室
研究員
Kenichiro TACHI

小林裕明***



同企画部企画課
企画係長
(前 都市河川研究室
研究員)
Hiroaki KOBAYASHI

都丸真人****



(前 都市河川研究室
交流研究員)
Mahito TOMARU